

Théâtre Vidy Lausanne - Ein zweischichtiges gefaltetes Flächentragwerk aus Brettsper Holz

Christopher Robeller, Julien Gamarro, Pierre Olivier Coanon and Yves Weinand
Institut für Holzbau IBOIS, Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne EPFL

1 ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Artikel beschreibt die erste vollmasstäbliche Umsetzung eines zweischichtigen, gefalteten Flächentragwerkes aus Brettsper Holzplatten, für das Projekt Théâtre Vidy Lausanne. (Abb.1 links) Durch eine neuartige Doppelzapfen-Verbindungstechnik dient die Form der Bauteile gleichzeitig als Fügehilfe für eine schnelle und präzise Assemblierung, als auch für eine direkte Übertragung der Kräfte zwischen den Platten und den beiden Schichten der Konstruktion. (Abb. 1 rechts) Ermöglicht wird dies durch projektspezifisch entwickelte CAD Plugins. Diese erlauben eine algorithmische Generierung der Bauteilgeometrien, und des CNC G-Codes für die vollautomatische 5-Achs Simultanbearbeitung.



Abb.1 links: Innenansicht des Theaters Lausanne Vidy, schwarz lasierte Brettsper Holzplatten aus Fichtenholz. Rechts: Vollmasstäblicher Prototyp einer zweischichtigen Kantenverbindung mit Doppelzapfen.

2 HINTERGRUND

Gefaltete Flächentragwerke vereinen in ihrer Form verschiedene Tragwerksfunktionen. Durch den starren Verbund mehrerer schräger Flächen entlang ihrer Kanten funktionieren die Elemente gleichzeitig als Platte, Scheibe und Rahmen. [1] Die daraus resultierende Steifigkeit erlaubt es auch grössere Abstände stützenfrei zu überspannen. Der Grossteil solcher Konstruktionen wurde in den 1960er und 1970er Jahren mit Beton realisiert, wobei die Platten meist nur in einer Richtung gefaltet wurden (sogenannte prismatische Faltwerke).

Interessante Studien zu gefalteten Zylindergewölben, bei denen die Platten in zwei Richtungen gefaltet waren, wurden in den 1970er Jahren anhand Glasfaserverstärkter Kunststoffplatten (GFK) untersucht. Dieses damals neue Plattenmaterial war aufgrund seines guten Verhältnisses von Gewicht und Festigkeit gut für solche leichten Flächentragwerke geeignet. [2] Die Konstruktion solcher Faltwerk mit dem Material Holz, welches zusätzlich zu dem hervorragenden Verhältnis aus Gewicht und Festigkeit auch ein nachhaltiges Bauen erlaubt, wurde erst mit der Einführung von querverleimten Brett- und Furniersperrholzplatten möglich. Ein erstes Beispiel für eine solche Konstruktion, inspiriert durch japanische Origami Papierfaltungen, findet sich in der Kapelle von St-Loup. [3]

Die ersten Prototypen von Faltwerken aus Sperrholzplatten wurden mit Hilfe von Vorlagen und Lehren gefertigt und gefügt. [3] So konnte mittels analoger Fertigungstechnologie ein experimentelles Faltwerksgewölbe aus insgesamt 144 Elementen gefügt werden. Als Folge der Fertigung und Fügung mittels Formen und Lehren musste jedoch mit der Wiederholung 8 geometrisch identischer Elemente konstruiert werden, womit nur einfach gekrümmte Faltflächenstrukturen realisierbar sind.

2.1 Integrale Verbindungstechnik

Ein wichtiger Schritt hin zu komplexeren, zweifach gekrümmten gefalteten Flächentragwerken, die aus einer grossen Anzahl unterschiedlich geformter Bauteile bestehen, findet sich in der sogenannten *integralen Befestigungstechnik*. Diese älteste Methode der Verbindungstechnik nutzt die Form von Bauteilen, um Kräfte zwischen ihnen zu übertragen. Eine Übertragung traditioneller Holzplattenverbindungen aus dem Tischlerhandwerk wurde in einem Forschungsprojekt demonstriert. Hierbei dienten die integralen Schwalbenschwanzzinken nicht nur der Übertragung der Kräfte, sondern vor allem auch als Fügehilfe für eine schnelle und präzise Assemblierung einer grossen Anzahl von unterschiedlich geformten Bauteilen. Schwalbenschwanzzinken gehören zur Gruppe der sogenannten prismatischen Verbindungen. Die Form solcher Verbindungen erlaubt nur eine Einschubrichtung, wodurch die einzig mögliche, korrekte Positionierung der Bauteile in der endgültigen Konstruktion in die vorgefertigte Verbindung eingebettet werden kann. Somit wurde vor allem durch die Verbindungstechnik eine doppelt gekrümmte Gesamtform des Tragwerks ermöglicht, die im Vergleich zu einer einfach gekrümmten Variante um 40% geringere Verformungen aufwies. [4]

Eine weitere Entwicklung, mit der sich die Anzahl unterschiedlicher Kantenverbindungen nochmals deutlich erhöht sind zweischichtige Faltwerkskonstruktionen aus Holzplatten. Eine neuartige Verbindungstechnik mit Doppelzapfenverbindern erlaubt hierbei eine vollständige integrale Fügung. So lassen sich entlang gefalteter Kanten alle 4 Platten direkt miteinander verbinden, wobei die Doppelzapfen auch als Abstandshalter zwischen den beiden Schichten dienen und Scherkräfte aufnehmen. [5] [6] Die Tabelle 1 verdeutlicht mit einem Vergleich bisheriger Prototypen und Gebäude mit dem Théâtre Vidy Lausanne die zunehmende Relevanz integrierter Fügehilfen.

Tab.1 Zunehmende Relevanz integrierter Fügehilfen für die Assemblierung von gefalteten Flächentragwerken mit einer grossen Anzahl unterschiedlich geformter Platten.

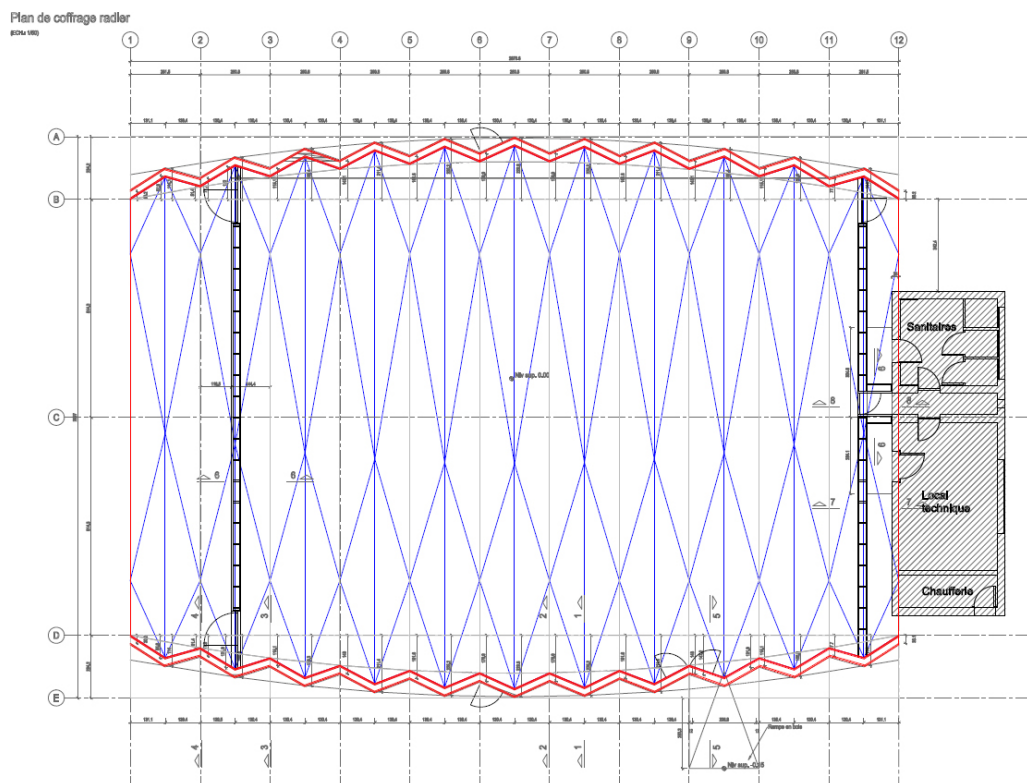
Projekt	Anzahl Platten	Unterschiedliche Platten	Unterschiedliche Kantenverbindungen
Origami Folded Plate, 2006 [3]	144	8	4
Chappelle St-Loup, 2010 [3]	39	39	67
Interlocking Folded Plate, 2014 [4]	107	107	239
Théâtre Vidy Lausanne, 2017	304	304	456

3 ENTWURF

Die Konstruktion für das Théâtre Vidy Lausanne stellt eine konsequente Weiterentwicklung auf Basis der vorherigen Prototypen dar. Die zweischichtige Konstruktion nutzt explizit die Möglichkeit der integralen Verbindungstechnik aus, besonders dünne Plattenquerschnitte miteinander zu verbinden. So kann das Tragwerk eine Distanz von 16-20 Metern stützenfrei, mit einer Plattenstärke von nur 45mm überspannen. Der Abstand zwischen den beiden Schichten beträgt hierbei 300 Millimeter von der Oberseite der äusseren Plattenlage, bis zur Unterseite (gleichzeitig die Sichtseite) der inneren Plattenlage.

Der hohle Zwischenraum mit einer Tiefe von 210 Millimetern dient gleichzeitig für die Dämmung, welche über Bohrungen in der oberen Plattenlage vor Ort eingeblasen wird. Somit bietet die doppelagige Konstruktion zusätzlich zu den statischen Eigenschaften noch einen entscheidenden Vorteil gegenüber einer einschichtigen Konstruktion mit dickeren Platten. Letztere erfordert zwar eine weniger anspruchsvolle Geometriegenerierung und Fügung, aber eine deutlich komplexere Feststoffdämmung, die auf einem derart geformten Faltenwerkdach nur mit hohem Aufwand realisierbar ist.

Abbildung 2 zeigt den Grundriss des Theaters, das zwischen den zwei gefalteten, 9m hohen Wandkonstruktionen (Abb.2 in rot) eine Grundfläche von 538m² überdeckt. In blau dargestellt ist die Grundform der Dachkonstruktion zu sehen, die im Gegensatz zu den vorherigen Prototypen auf einer nicht abwickelbaren Form basiert. An den Knotenpunkte des Polygonnetzes treffen sich jeweils 6 Kanten, und ihre Position in der Längsachse des Gebäudes folgt 3 verschiedenen Kreisbögen, von denen die zwei äusseren auf jeweils unterschiedlicher Höhe in vertikalen Schnittebene des Gebäudes liegen. Durch diese asymmetrische Form wird unter anderem der Ablauf von Regenwasser auf dem Dach ermöglicht.



4 KONSTRUKTIONSSYSTEM

Der Aufbau des Gebäudes erfolgt in insgesamt 11 Achssegmenten (siehe Abb. 2). Jedes Achssegment wird in 3 Teilen vorgefertigt, jeweils zwei Wandelemente und ein Dachelement. Vor Ort werden die Wandsegmente mit dem jeweiligen Nachbarsegment verbunden, und anschliessend das Dachsegment aufgesetzt. Somit erfolgen 18 Fügungsschritte für jedes Achssegment, davon 17 in der Vorfertigung und einer auf der Baustelle.

Bei der angewandten zweischichtigen Fügungstechnik existieren vier verschiedene Schritte mit jeweils unterschiedlichen Zapfenformen, abhängig von der jeweiligen Position der Faltkante in der Konstruktion. Grundsätzlich wird zwischen zwei Situationen unterschieden, in denen entweder ein Segment mit einem Nachbarsegment verbunden wird (Abb.3, Schritt 1 und 2), oder dem Fall, dass ein Segment gleichzeitig mit zwei Nachbarsegmenten verbunden wird (Abb.3, Schritt 3 und 4). Während in den beiden ersten Fällen die Zapfen rechtwinklig zur Kante orientiert sind, ist in den beiden anderen Fällen eine Rotation der Zapfen innerhalb der Plattenebene nötig, so dass die Einschubrichtung aller Zapfen des jeweiligen Bauteils parallel ist.

Einen Sonderfall stellt hierbei der Fall in Abb.3 Schritt 4 dar, bei dem ein Bauteil mit Rechteckdurchbrüchen auf gleichzeitig auf vier Bauteile mit Zapfen- und Doppelzapfenverbindern aufgesteckt werden muss. Der Einschub dieser Platte ist nur möglich, wenn die Zapfen auf den 4 anderen Platten alle parallel sind. Nachdem jeweils 2 dieser Platten sich aber auf unterschiedlich orientierten Ebenen befinden, existiert nur eine mögliche Einschubrichtung für die einzuschiebende Platte mit den Durchbrüchen. Diese Richtung findet sich entlang der Verschneidung der Ebenen der zwei benachbarten Segmente.

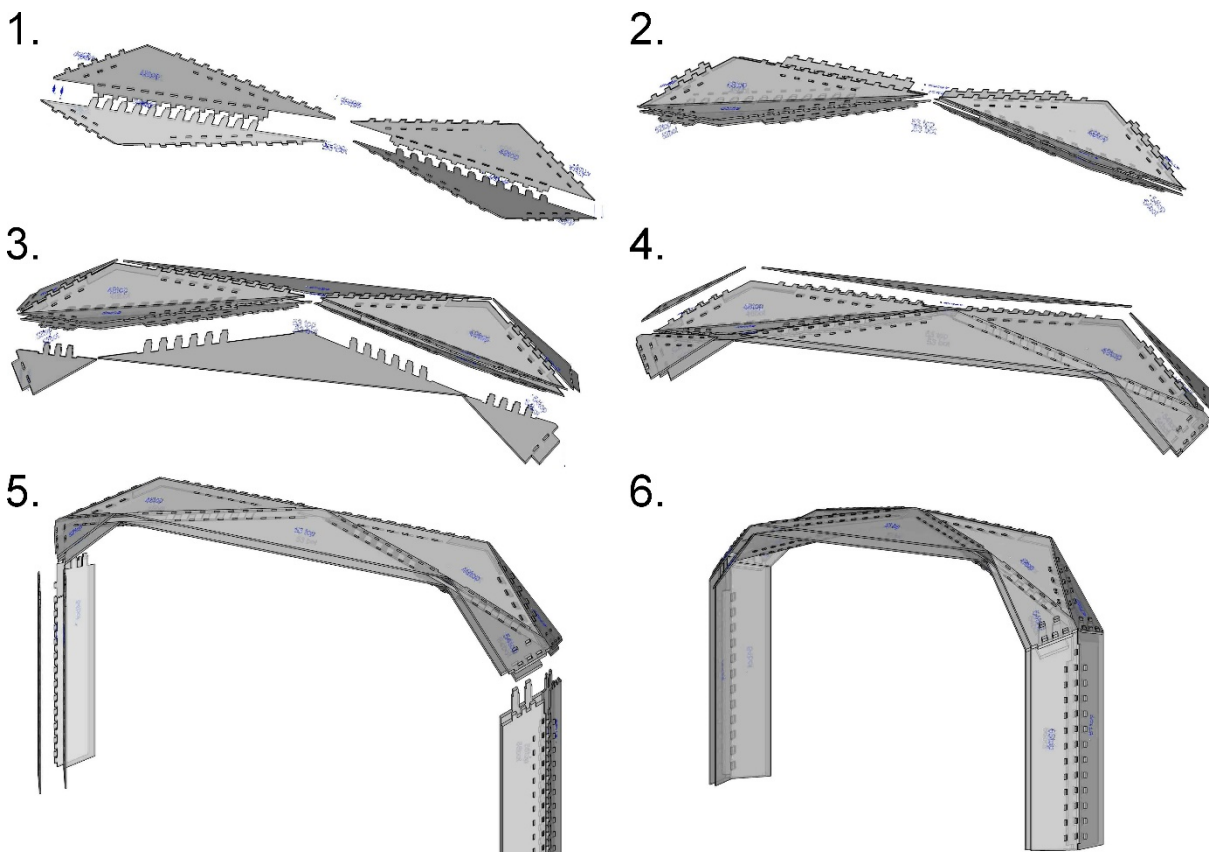


Abb.3 Assemblierung eines Achssegmentes. In den Schritten 1 und 2 wird ein Segment mit einem Nachbarsegment verbunden, die Zapfen sind rechtwinklig zur Kante. In den Schritten 3 und 4 sind die Zapfen rotiert um einen parallelen Einschub zu ermöglichen. Schritt 5 erfolgt anders als die vorherigen Fügungen nicht in der Vorfertigung, sondern auf der Baustelle.

5 UNTERSUCHUNG DER VERBINDUNGEN

Das globale mechanische Verhalten der Konstruktion für das Theater Vidy ist komplex, insbesondere mit dem anisotropischen Material Holz. Aus diesem Grund wurden verschiedene experimentelle Versuche durchgeführt, um die Festigkeit der Verbindungen unter Berücksichtigung verschiedener Parameter zu untersuchen, und die am besten geeigneten Holzwerkstoffplatten zu bestimmen.

Bei vorangegangenen Studien zur Festigkeit integraler Zinken- und Zapfenverbindungen wurden ausschliesslich Furniersperrholzplatten (FSP) verwendet, die aufgrund der vielen, jeweils nur 3mm starken querverleimten Schichten eine sehr homogene Struktur aufweisen. Für das Projekt des Theaters Lausanne Vidy wurden erstmals auch Brettsperrholzplatten (BSP) für eine integrale Verbindung mit Zapfen in Erwägung gezogen. Einer der Gründe hierfür war die besondere Nachhaltigkeit, da in diesem Fall regionales Schweizer Holz verwendet werden konnte. Eine Besonderheit der im folgenden Abschnitt untersuchten Brettsperrholzplatten stellt die zusätzliche seitliche Verklebung der Brettlagen dar. Hierdurch wird ein homogeneres Verhalten erreicht, was für die integralen Verbindungen von grosser Bedeutung ist.

Im Fokus der Untersuchungen stand das Verhalten der Doppelzapfen- und Einzelzapfenverbindungen unter einer Biegebeanspruchung. Diese Beanspruchung ist in gefalteten Holztragwerken entscheidend. Abbildung 4 zeigt ein vereinfachtes, einschichtiges Finite Elemente Modell, mit dessen Hilfe die grössten zu erwartenden Biegemomente ermittelt wurden.

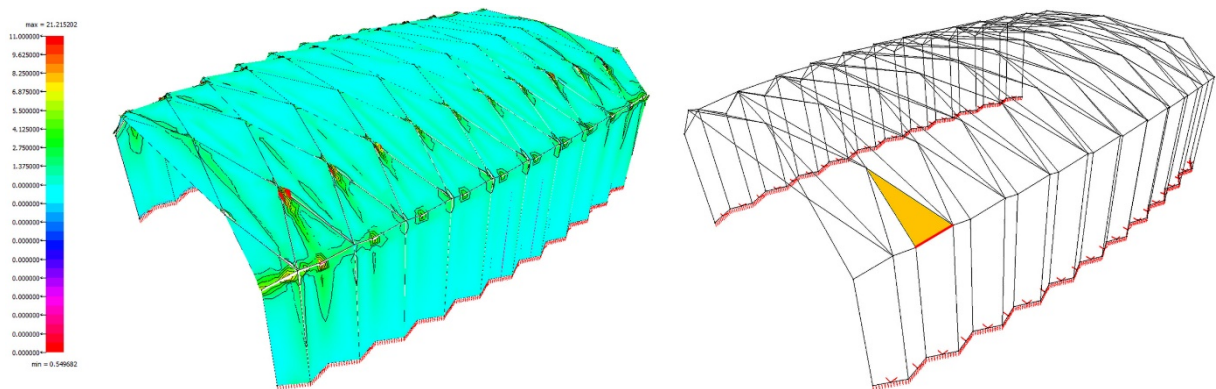


Abb.4 Für erste Untersuchungen der zu erwartenden Biegekräfte wurde ein vereinfachtes, einschichtiges Finite Elemente Modell genutzt. Das rechte Bild zeigt die Position der Platte und Kante mit der höchsten Biegebelastung, die als Vergleichsgrundlage herangezogen wurde.

5.1 Untersuchung der Zapfen an verschiedenen Holzwerkstoffplatten

Die erste Versuchsreihe wurde mit einer einschichtigen Zapfen-Loch Verbindung zwischen zwei Platten im Winkel von 90° durchgeführt. Die Zapfenbreite betrug dabei 150 Millimeter, und die Faserrichtung der Plattendecklage war jeweils längs zur Ausrichtung des Zapfens.

Um einen Vergleich verschiedener Holzwerkstoffplatten zu erhalten, wurden zwei verschiedene Brettsperrholzplatten (mit seitlich verklebten Brettlagen) und eine Furniersperrholzplatte untersucht (siehe Tabelle 2). Zudem wurden vier verschiedene Zapfenformen untersucht, wobei jeweils 12 Probekörper mit der gleichen Geometrie geprüft wurden. Mit Hilfe dieses Versuchs konnte der Einfluss der Zapfenrotation entlang der Faltkante untersucht werden. Dies ist wichtig, da die Faltwinkel im Theaterdach unterschiedlich sind und einer solche Rotation θ der Zapfen erfordern. Hierbei zeigt sich zwischen einer Rotation von $\theta=0^\circ$ und einer Rotation von $\theta=15^\circ$ kein Unterschied bei der Biegesteifigkeit.

Ebenfalls wurde der Einfluss einer zusätzlichen Verschraubung untersucht. Mit der Verschraubung waren die Versuchsergebnisse homogener, da eine ideale Ausgangsposition der Platten gewährleistet ist. Im Schnitt wurde so eine um ca. 10% höhere Biegesteifigkeit erzielt.

Tab.2 Übersicht der drei untersuchten Holzplattenwerkstoffe, 13-lagiges Furniersperrholz im Vergleich mit 3-lagigem und 5-lagigem Brettsperrholz.

	BSP 40	BSP 45	FSP 39 (KERTO-Q)
Plattenstärke (mm)	40	45	39
Aufbausymbol	I-I	I-I-I	II-III-III-II
Schichten	12.5mm / 15mm / 12.5mm	5 x 9mm	13 x 3mm

Abbildung 5 zeigt den Biegeversuchsaufbau für die einschichtigen Zapfen. Ein 20 kN Zylinder, der auf einen Stahlhebelarm drückt, überträgt die Rotationsbewegung auf die horizontale Platte mit dem Zapfenloch, während die vertikale Platte mit dem Zapfen starr mittels 4 Schrauben befestigt ist. Durch den Hebelarm wird sichergestellt dass die Krafteinleitung zur horizontalen Platte immer lotrecht erfolgt. Der Rotationswinkel und die Kräfte wurden durch 2 Neigungsmesser und 4 Kraftmesszellen erfasst.

Das Versagen der Probekörper unter der Biegebelastung erfolgte stets durch zwei Bruchstellen der Zapfenlochplatte (siehe Abb. 5, links). Hier umfasst eine Protrusion den Zapfen, dessen Länge in den Probekörpern identisch mit der Plattenstärke ist. Im Bereich des Zapfens kann dieser Block der Biegung der äusseren Bereiche nicht folgen. Zuerst erfolgt ein Bruch der längs ausgerichteten Decklage der Platte, während die darunter liegende Querlage noch intakt ist. Bei einer weiteren Biegung wird der Rollschub in der Querlage zu gross und es tritt auch dort ein Bruch ein.

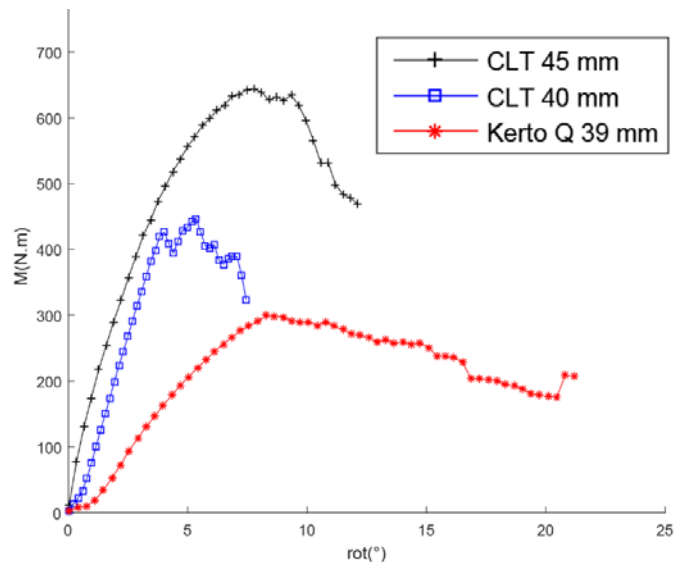


Abb.5 Untersuchung der Biegesteifigkeit von Zapfenverbindern an verschiedenen Brettsperrholz und Furniersperrholzplatten. Links: Versuchsaufbau mit Neigungs- und Kraftmessung. Rechts: Die besten Ergebnisse wurden mit der 45mm starken Brettsperrholzplatte erzielt (CLT 45mm).

Die Untersuchungen mit den einschichtigen Verbindungen mit verschiedenen Plattentypen haben aufgezeigt, dass für die speziellen, in diesem Projekt eingesetzten integralen Zapfenverbindungen Brettsper Holzplatten unter einer Biegebelastung bessere mechanische Eigenschaften aufwiesen als die Furniersper Holzplatten. Die 45mm starke Brettsper Holzplatte mit 5-schichtigem Aufbau stellt dabei aus mehreren Gründen die beste Lösung dar:

- Höhere Steifigkeit im Vergleich zu 40 mm BSP
- Höheres FlieBsmoment
- Erlaubt eine höhere Biegung im elastischen Bereich, im Vergleich zu 40 mm BSP
- Bruchmoment fast doppelt so hoch wie bei 40 mm BSP
- Homogenes Verhalten auch bei schrägen Zapfen (untersucht bei 0 und 15°)

5.2 Untersuchung der Zapfen an zweischichtigen Probekörpern

Im Anschluss an die Untersuchung der einschichtigen Zapfenverbindungen, und der Auswahl der 45mm starken Brettsper Holzplatten als am besten geeignetes Material, wurden Biegeversuche mit dem tatsächlichen, zweischichtigen Aufbau getestet. Hierbei ist die obere Schicht der Probekörper mit einem Einzelzapfen verbunden, während die beiden unteren Schichten sich mit einem Doppelzapfen gegenseitig durchdringen, und im Anschluss mit der Oberschicht verbunden sind.

Die experimentell untersuchte, in Abbildung 6 gezeigte Konfiguration der Zapfen stellt dabei einen Sonderfall dar, bei dem eine der vier Verbindungslinien nicht integral gelöst ist. Dieser Sonderfall tritt bei den In-Situ Verbindungen ein, bei denen das vorgefertigte Dachteil auf die vorgefertigten Wandsegmente aufgesetzt wird. Hier müssen alle vier Verbindungslinien in einem gleichzeitig ausgeführten Schritt gefügt werden. Im Bild sind die Verschraubungspunkte dieser Verbindungslinie in rot dargestellt. Diese spezielle Verbindung wurde ausgewählt, da sie im Finite Elemente Modell (siehe Abb. 4) die höchsten Biegemomente erhält.

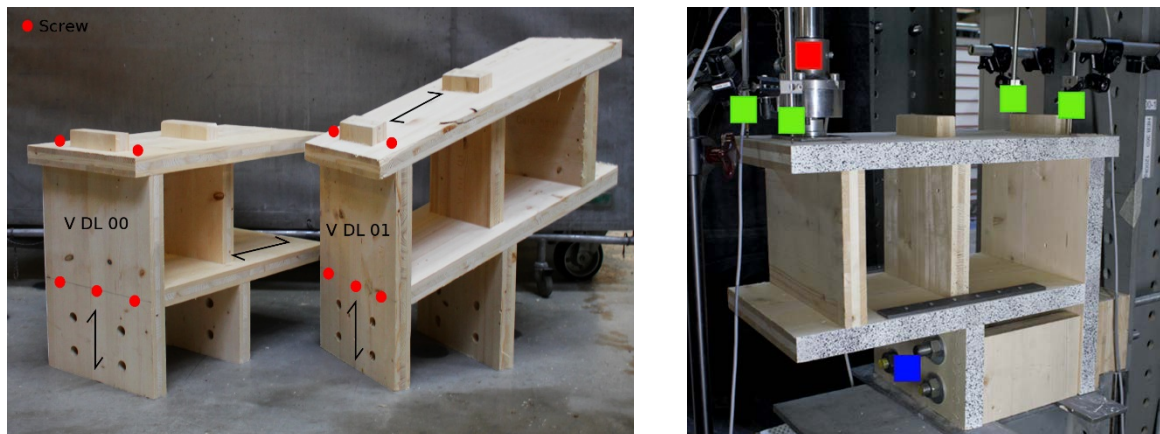


Abb.6 Links: Probekörper für die Untersuchung der Biegelastung an zweischichtigen Ecken, Faltwinkel 90° und 110°. Die roten Punkte zeigen zusätzliche Schraubverbindungen, die vor allem die Position der Bauteile während der Montage sichern. Rechts: Versuchsaufbau, Wegmesser in grün, Kraftmessung in rot, Fixierung mit 4 Bolzen in blau markiert.

In den Versuchen zeigte sich eine erhebliche Steigerung der mechanischen Effizienz durch die zweischichtige Ausführung. Die Verbindung verhält sich dabei prinzipiell wie die einschichtige Variante: Um das Biegemoment auszugleichen, wirken zwei entgegengesetzte Kräfte, deren Intensität proportional zum Hebelarm ist. Bei einer einschichtigen Verbindung ist dies gleich der Plattenstärke von 45mm. Bei der zweischichtigen Platte vergrößert sich der Wert auf ca. 250mm. Hierdurch werden die Kräfte gegenüber der einschichtigen Variante auf ein Fünftel reduziert.

6 AUTOMATISIERTE BERECHNUNG DER BAUTEILE

Die Erzeugung aller Bauteile erfolgt automatisch mittels eines eigens für das Projekt entwickelten CAD Plugins, entwickelt mit dem Software Development Kit (SDK) Rhino Commons und der Programmiersprache C#. Als Benutzerschnittstelle dient die Software Grasshopper, in der die Eingabeparameter der Konstruktion mit einer direkten Visualisierung der 3D Bauteile bearbeitet und verändert werden können (Abb. 7).

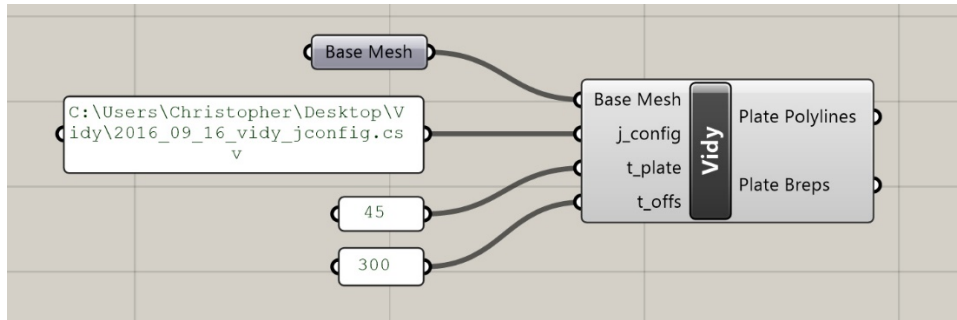
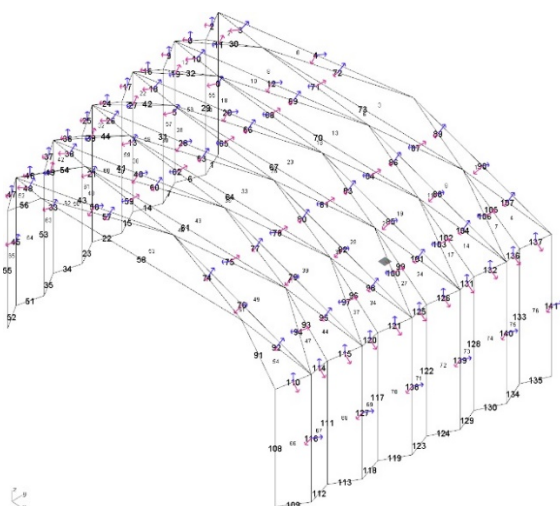


Abb.7 CAD Plugin für die Generierung der 3D Bauteilgeometrien. Eingabeparameter: 1. Polygonnetz der Innenflächen, 2. CSV Datei mit Verbindungsparametern, 3. Plattenstärke in mm. 4. Distanz zwischen Unterseite der unteren Plattenlage und Oberseite der oberen Plattenlage in mm.

Die vier Eingabeparameter des projektspezifischen CAD Plugins sind wie folgt: 1. Ein einfaches, einschichtiges Polygonnetz mit planaren Dreiecksflächen für die Dachelemente, und Vierecksflächen für die Wandelemente (Abb. 8, links). Mit Hilfe dieses Flächenmodells werden die Identifikationsnummern für alle Bauteile und Kantenverbindungen verwaltet. 2. Der zweite Eingabeparameter ist eine Comma-separated Value (CSV) Textdatei, in der die Parameter der einzelnen Verbindungen verwaltet werden (Abb. 8, rechts). Dies sind unter anderem grundlegende Informationen zur Art der Verbindung an dieser Kante, die Einschubrichtungen für die integralen Zapfenverbindungen und weitere verbindungsspezifische Variablen. Weitere Parameter sind 3. die Stärke der Platten in Millimetern, und 4. die Gesamttiefe des zweischichtigen Aufbaus, von der Unterseite der unteren Platte zur Oberseite der oberen Platte.



8 regl	pos	0	0	1	-0.80073	0	-0.434378
9 regl	pos	0	0	1	-0.894058	0	-0.447952
10 regl	pos	0.106079	0.836673	0.537331	-0.361602	-0.909274	0.20607
11 regl	pos	0.127279	-0.806276	0.4829	-0.309405	0.899662	0.232698
12 regl	neg	0.362602	0.905274	-0.20607	0.369405	-0.899662	-0.232698
13 regl	pos	-0.464236	0.885712	0	-0.35664	-0.934242	0
14 grnd	pos						
15 grnd	pos						
16 regl	pos	0	0	1	-0.894058	0	-0.447952
17 regl	pos	0	0	1	-0.879179	0	-0.476491
18 regl	pos	0.090251	0.814513	0.573083	-0.372836	-0.905092	0.20452
19 regl	pos	0.135143	-0.875311	0.464292	-0.388832	0.884961	0.25623
20 regl	neg	0.372836	0.905092	-0.204452	0.388832	-0.884961	-0.25623
21 regl	pos	-0.489643	0.871923	0	-0.328067	-0.944655	0
22 grnd	pos						
23 grnd	pos						
24 regl	pos	0	0	1	-0.879179	0	-0.476491
25 regl	pos	0	0	1	-0.852337	0	-0.522992
26 regl	pos	0.067545	0.785761	0.614828	-0.395895	-0.893845	0.210496
27 regl	pos	0.141675	-0.880563	0.452257	-0.420741	0.861582	0.283996
28 regl	neg	0.069728	0.950052	-0.304202	0.088326	-0.918538	-0.38934
29 vcon	neg						
30 vcon	neg						
31 vcon	neg						
32 vcon	neg						
33 regl	pos	-0.514515	0.857481	0	-0.298746	-0.954333	0
34 grnd	pos						
35 grnd	pos						
36 regl	pos	0	0	1	-0.852337	0	-0.522992
37 regl	pos	0	0	1	-0.805878	0	-0.582088
38 regl	pos	0.033066	0.748508	0.6623	-0.433874	-0.873138	0.222226
39 regl	pos	0.146089	-0.88184	0.448349	-0.468269	0.826819	0.3116
40 regl	neg	0.062815	0.938999	-0.334085	0.107956	-0.893689	-0.429506
41 vcon	neg						
42 vcon	neg						
43 vcon	neg						
44 vcon	neg						
45 regl	pos	-0.538877	0.842385	-0.0707	-0.268623	-0.963246	0

Abb.8 links: Polygonnetz der Innenflächen des Theaters, inkl. Visualisierung der Bauteil- und Verbindungsnummern und Einschubrichtungen..

6.1 Ausgabe der 3D Bauteile

Das in Abschnitt 6 vorgestellte CAD Plugin erzeugt parallel zwei Datenausgaben. Zum einen werden die 3D Bauteile im Gesamtmodell dargestellt, zum anderen werden alle Platten auf der zweidimensionalen XY-Ebene des CAD Modells flach ausgelegt. Die Darstellung der Bauteile, inklusive der Durchbrüche für die Zapfenverbindungen erfolgt als Gruppierung von Polygonzugpaaren. Zusätzlich werden fertigungsrelevante Parameter angezeigt, die aus der Grundform des Polygonnetzes und den Verbindungsparametern resultieren. Hierzu gehören die Maximal- und Durchschnittswerte der Kantenlängen (max 12.2m / \varnothing 5.5m) und der dihedralen Winkel zwischen benachbarten Flächen (max 138° / \varnothing 125°).

Abbildung 9 zeigt die für die Erzeugung der Fabrikationsdaten vorbereiteten Platten von einem der insgesamt 11 Achssegmente des Gebäudes (hier das Segment Nr.1, zwischen den Achsen 1 und 2, siehe Abb. 2). Ein Achssegment besteht aus jeweils drei vorgefertigten Bauteilen: Zwei Wandelemente, in Abbildung 9 in rot dargestellt, und 1 Dachelement, in blau dargestellt. Die Wandelemente werden vor Ort jeweils am Fusspunkt und am benachbarten Achssegment befestigt, danach wird das Dachelement, bestehend aus insgesamt 20 in der Vorfertigung assemblierten Plattenbauteilen, auf die Wandelemente aufgesetzt. Diese In-Situ Zapfenverbindung ist ebenfalls als Doppelzapfenverbindung ausgeführt, jedoch mit einigen Anpassungen für eine erleichterte Fügung vor Ort.

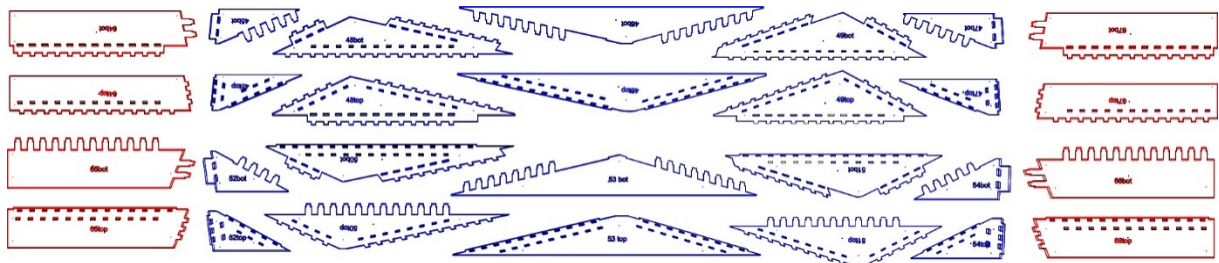


Abb.9 Flach ausgelegte Bauteile eines vorgefertigten Moduls, bestehend aus vier Wandsegmenten mit jeweils 2 Platten (rot), und insgesamt 10 Dachsegmenten mit jeweils 2 Platten. (blau)

7 FABRIKATION

Aufgrund der 114 unterschiedlichen Faltwinkel in der grundlegenden Faltform des Theaters sind diverse Schrägschnitte für die Fabrikation der Bauteile erforderlich. Die Fabrikation der Teile erfolgt daher mit einem 5-Achs CNC Bearbeitungszentrum.

Die benötigte Anstellung des Werkzeuges ergibt sich aus dem jeweiligen dihedralen Winkel der Faltkante, abzüglich 90°. Somit könnte eine exakt rechtwinklige Kantenverbindung mit einer 3-achsigen CNC Fräse hergestellt werden. Im Fall des Theaters ergibt sich aus dem durchschnittlichen dihedralen Winkel von 125° eine durchschnittlich benötigte Werkzeuganstellung von 35°. Aus dem Maximalwinkel von 138° folgt eine maximale Anstellung von 58°. Unter Berücksichtigung des Werkzeughalterprofils, in unserem Fall ein schlankes Thermo-Schrumpfspannfutter, lässt sich so die benötigte Ausspannlänge des Fingerfräasers berechnen.

Aufgrund vieler konkaver Eckpunkte in den Polygonzügen, beispielsweise zwischen den Zapfen und bei den Durchbrüchen, bietet sich eine Bearbeitung mit einem Fingerfräser an. Die dafür notwendige 5-Achs CNC Simultanbearbeitung, die an ungefähr 500 verschiedenen Bauteilkanten, mit tausenden, unterschiedlich geneigten Zapfengeometrien erforderlich ist, lässt sich mit CAM Softwarelösungen für reguläre Holzbauaufgaben nicht effizient erzeugen.

Anstelle dessen setzen wir ein spezielles CAD Plugin ein, das für die automatisierte G-Code Generierung integral gefügter Holzwerkstoffplatten eigens entwickelt wurde. Diese Software kam schon bei mehreren vorangegangenen Projekten zum Einsatz, und wurde für das Theater Vidy an das Bearbeitungszentrum des ausführenden Betriebes angepasst. [7] Mit Hilfe des CAD Plugins können verschiedene spezielle Details integraler Verbindungen automatisiert erzeugt werden. Dazu gehören beispielsweise Kerbschnitte in den konkaven Ecken, die für den Einschub der spitzwinkligen Gegenstücke erforderlich sind.

Abbildung 10 zeigt die Anwendung verschiedener Funktionen des Plugins für die Erzeugung und Simulation der Bearbeitung, eingebettet in einer visuellen Programmieranwendung. So können die verschiedenen Eingangsvariablen, beispielsweise Material- und Maschinenparameter schnell und übersichtlich angepasst und überprüft werden, um ein optimales Ergebnis bei der Bearbeitung zu erreichen. Der G-Code wird dabei vollautomatisch erzeugt.

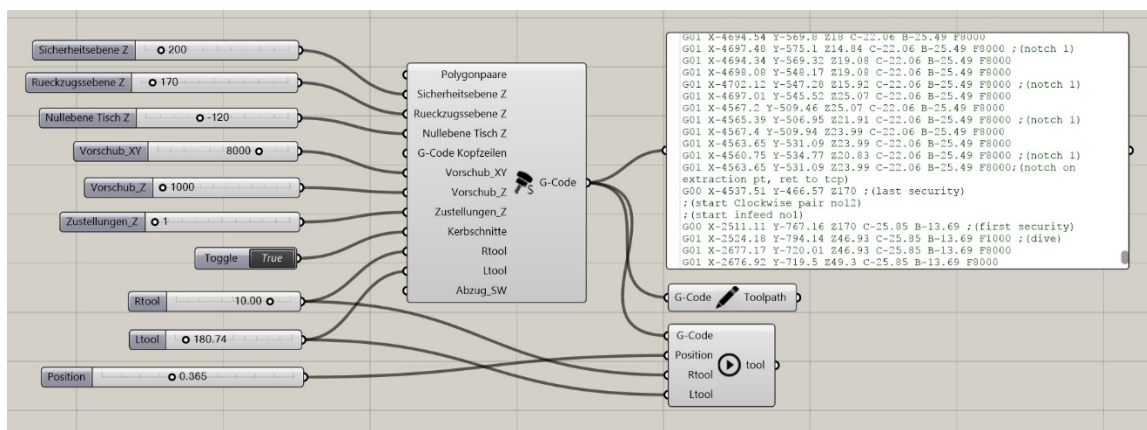


Abb. 10 Automatisierte G-Code Erzeugung und Maschinensimulation für die 5-Achs Simultanbearbeitung via CAD Plugin. [7]

Datengrundlage für die Erzeugung des Maschinencodes sind Polygonkonturzugpaare. Abbildung 10 zeigt wie ein Bauteil ausgewählt wird. Nach der Auswahl wird sofort der G-Code für die Bearbeitung angezeigt. Gleichzeitig werden die Fahrwege der Maschine visualisiert und eine Simulation der Maschinenbewegungen kann abgespielt werden (siehe Abbildung 11).

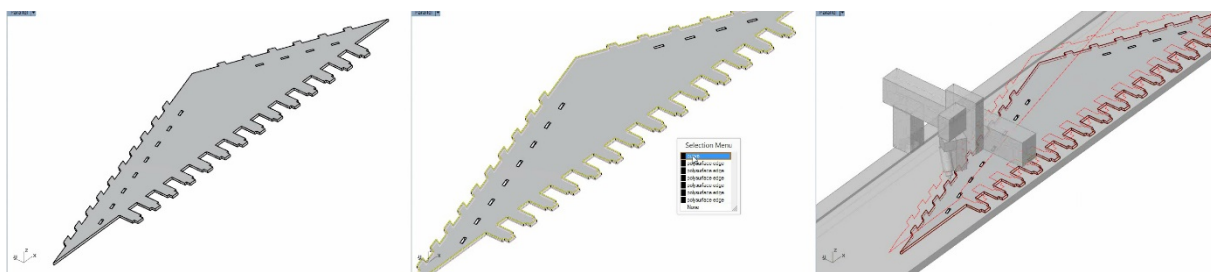


Abb. 11 Generierung des G-Code Programms für die CNC Bearbeitung mittels eines CAD Plugins. Nach einer Selektion von Polygonzugpaaren, wird der Maschinenspezifische G-Code automatisch ausgegeben. Gleichzeitig wird eine Simulation der Bearbeitung visualisiert, mit der eventuelle Kollisionen überprüft werden können.

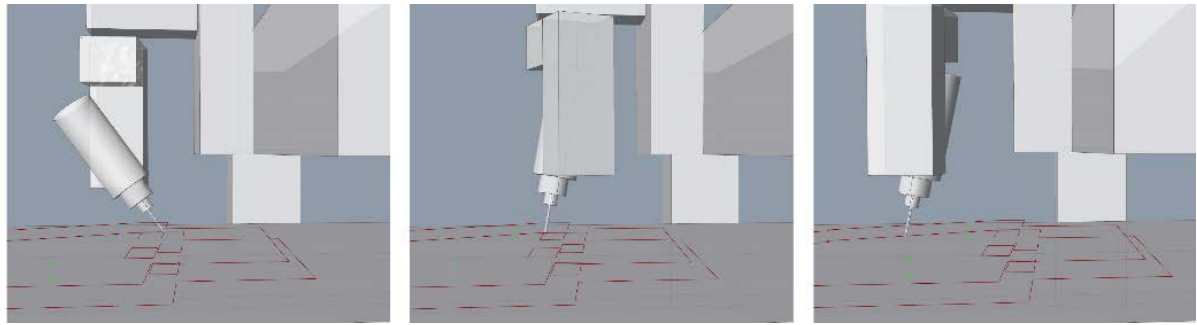


Abb. 12 Simulation der Maschinenbewegungen im CAD Plugin: Die Herstellung der Plattenbauteile mit konkaven Eckpunkten und unterschiedlich schrägen Flanken erfolgt mittels 5-Achs Simultanbearbeitung. Das Werkzeug wird um beide Rotationsachsen des CNC Bearbeitungszentrums gedreht, während gleichzeitig eine Translationsbewegung erfolgt.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Projekt Théâtre Vidy Lausanne zeigt auf, wie automatisierte Fertigungstechnologie, die in den Holzbaubetrieben vielfach bereits vorhanden ist, für neue Lösungen in der Fügetechnik genutzt werden kann. Die so ermöglichten integralen Verbindungen erlauben es nicht nur Kräfte zwischen den Bauteilen zu übertragen, sondern sie dienen auch als Fügehilfe. So lässt sich bereits in der Vorfertigung eine eindeutige Position der Bauteile zueinander in die Form der Verbindungen einbetten. Dies ermöglicht eine einfache, schnelle und präzise Fügung, auch bei vielen verschiedenen Plattenformen und Flächenwinkeln.

Für das Théâtre Vidy Lausanne sind die Verbindungen von besonderer Bedeutung, weil die zweischichtige Ausführung, die statisch und auch bezüglich der Dämmung grosse Vorteile bietet, besondere Anforderungen an die Fügetechnik stellt. Die hier angewandte Methode für zweischichtige Falterwerke übernimmt hierbei nicht nur die Verbindungen innerhalb der oberen und unteren Plattenschicht, sondern auch die Verbindungen zwischen den beiden Schichten. Dies gilt sowohl für die Übertragung von Kräften, als auch für die Funktion als Abstandshalter und Positionierhilfe.

Ermöglicht wird die automatisch gefertigte Fügetechnik durch die Entwicklung und Anwendung von projektspezifischen CAD Plugins. So lassen sich sowohl die Bauteilgeometrien, als auch die Maschinendaten für die Produktion der Teile automatisch erzeugen. Die grundlegenden Parameter, beispielsweise die Falterform, Plattendicke und Abstand zwischen den Plattenlagen, bleiben dabei stets anpassbar. So können während des Projektverlaufes auch noch Änderungen an diesen Daten erfolgen.

REFERENZEN

[1] Engel, H. Tragsysteme, Hatje Cantz Verlag, 2004

[2] Huybers, P. See-through structuring: A method of construction for large span plastics roofs, PhD Thesis, TU Delft, 1972

[3] H. U. Buri, Y. Weinand (Dir.). Origami - Folded Plate Structures. PhD Thesis, EPFL, n° 4714 (2010), DOI: [10.5075/epfl-thesis-4714](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-4714)

[4] C. Robeller and Y. Weinand. Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels, in *International Journal of Space Structures*, vol. 30, num. 2, p. 111-122, 2015. DOI: [10.1260/0266-3511.30.2.111](https://doi.org/10.1260/0266-3511.30.2.111)

[5] C. Robeller, Y. Weinand (Dir.). Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures. PhD Thesis, EPFL, n° 6564 (2015), pp 136-137, DOI: [10.5075/epfl-thesis-6564](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6564)

[6] Robeller, C., and Weinand, Y. 2016. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Sydney: Springer International Publishing, Cham, *Fabrication- Aware Design of Timber Folded Plate Shells with Double Through Tenon Joints*, pp 166–177. DOI: [10.1007/978-3-319-26378-6_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_12)

[7] Robeller, C., and Weinand, Y. 2016. “A 3d cutting method for integral 1DOF multiple-tab-and-slot joints for timber plates, using 5-axis CNC cutting technology.” In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*. Vienna: Curran Associates Inc.

[8] S. Roche, J. Gamarro and Y. Weinand. Multiple Tab-and-Slot Joint: Improvement of the Rotational Stiffness for the Connection of Thin Structural Wood Panels. *World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria, August 22-25, 2016.

[9] Roche, S., Robeller, C., Humbert, L., and Weinand, Y. 2015. “On the semi-rigidity of dovetail joint for the joinery of LVL panels.” *European Journal of Wood and Wood Products* 73, 5: 667–675. DOI: [10.1007/s00107-015-0932-y](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0932-y)